

# “Статус нейтринных осцилляционных экспериментов”

А. В. Буткевич

Институт ядерных исследований РАН, Москва

26.05.2017

Эксперименты с солнечными, атмосферными, реакторными и ускорительными нейтрино наблюдают эффекты, связанные с осцилляциями нейтрино, которые обусловлены наличием у нейтрино массы и смешиванием массовых состояний нейтрино.

- (★) Все убедительные данные о нейтринных осцилляциях могут быть описаны в рамках 3-х флейворной парадигмы осцилляций нейтрино.
- (★) **Осцилляции нейтрино.** Гипотеза о возможном смешивании нейтрино *Понтекорво (1957), Маки, Накагава, Саката (1962)*. Нейтрино с определенным ароматом  $\nu_\alpha$ , где  $\alpha = e, \mu, \tau$  является суперпозицией  $\nu_i$ ,  $i=1,2,3,\dots$  собственных состояний с массами  $m_i \neq m_j$

$$\nu_\alpha = \sum U_{\alpha i} \nu_i$$

В случае 3-х дираковских состояний  $\nu_i$  матрица смешивания лептонов  $U_{\alpha i}$  зависит от 3-х углов смешивания  $\theta_i$  и дираковской фазы нарушения CP-инвариантности в лептонном секторе  $\delta$ .

CP-инвариантность сохраняется, если  $U = U^*$  - реальная матрица, т.е.  
 $\delta = 0, \pi$

## 3-х флейворная парадигма нейтринных осцилляций

Матрица смешивания дираковских массивных нейтрино

Понтекорво-Маки-Накагава-Саката (аналогично смешиванию кварков)

$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ ,  $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ ,  $\delta$ -фаза нарушения CP-инвариантности

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

атмосферные, ускоритель    ускоритель, реактор    солнечные, реактор

В случае майорановских массивных нейтрино матрица смешивания  $U_M$  содержит две дополнительных фазы нарушения CP-инвариантности ( $\xi_1, \xi_2$ ) и имеет вид

$$U_M = U \times \text{diag}(1, \exp(i\xi_1), \exp(i\xi_2))$$

Эффекты осцилляций - после прохождения расстояния  $L$ :  $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ , где  $\alpha, \beta = e, \mu, \tau, \dots$ . Вероятности осцилляций зависят от энергии нейтрино  $E$  и пройденного расстояния  $L$ , а также от разностей квадратов масс нейтрино  $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ , углов смешивания  $\theta_{ij} = [0, \pi/2]$ , фазы  $\delta = [0, 2\pi]$  и иерархии масс нейтрино. Фазы ( $\xi_1, \xi_2$ ) не влияют на эффекты осцилляций нейтрино.

Измеренные значения параметров 3-х нейтринных осцилляций.

PDG 2016.

Атмосферные и ускорительные (анти)нейтрино (“атмосферные” параметры)

$$\Delta m^2 = m_3^2 - (m_2^2 + m_1^2)/2$$

иерархия масс: нормальная (NH)  $m_1 \ll m_2 \ll m_3$  и  $\Delta m_{23}^2 > 0$  или обратная (IH)  $m_3 \ll m_1 \ll m_2$  и  $\Delta m_{23}^2 < 0$ ?

$$|\Delta m_{23}^2| = (2.50 \pm 0.043) \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2 \text{ (NH)}$$

$$|\Delta m_{23}^2| = (2.46 \pm 0.046) \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2 \text{ (IH)} \quad \sigma \approx 1.7\%$$

$$\sin^2 \theta_{23} = 0.437_{-0.019}^{+0.060} \text{ (NH)} \text{ и } \sin^2 \theta_{23} = 0.569_{-0.062}^{+0.023} \text{ (IH)} \quad \sigma \approx 9\%$$

Солнечные и реакторные (анти)нейтрино (“солнечные” параметры)

$$\Delta m_{21}^2 = (7.37_{-0.022}^{+0.026}) \cdot 10^{-5} \text{ эВ}^2 \quad \sigma \approx 2.3\%$$

$$\sin^2 \theta_{21} = 0.297 \pm 0.019 \quad \sigma \approx 5.8\%$$

Реакторные, ускорительные (анти)нейтрино

$$\sin^2 \theta_{13} = 0.0214 \pm 0.001 \text{ (NH)} \text{ и } \sin^2 \theta_{13} = 0.0218 \pm 0.001 \text{ (NH)} \quad \sigma \approx 4.8\%$$

Ускорительные (анти)нейтрино

$$\delta/\pi = 1.35_{-0.143}^{+0.213} \text{ (NH)} \text{ и } \delta/\pi = 1.32_{-0.163}^{+0.223} \text{ (IH)}$$

## Что еще необходимо сделать в осцилляционных экспериментах

Измерить вероятности  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ,  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  переходов, вероятность выживания  $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$  и определить

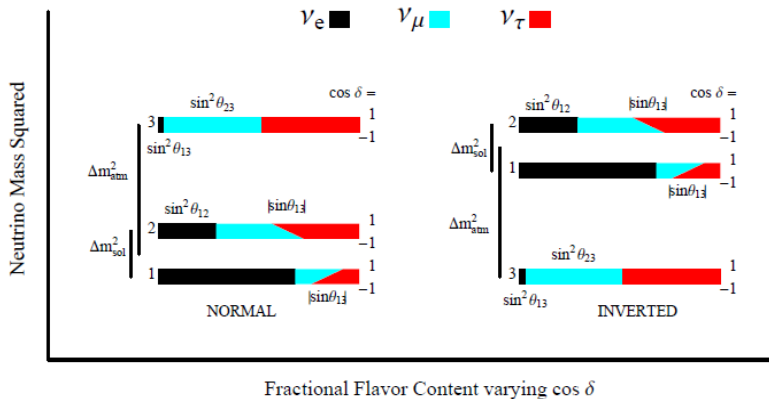
- (★) иерархию масс: нормальная (NH)  $m_1 \ll m_2 \ll m_3$ , или обратная (IH)  $m_3 \ll m_1 \ll m_2$ ?
- (★) фазу нарушения CP инвариантности  $\delta$  в лептонном секторе  $\delta \neq [0, \pi]$
- (★) уточнить значения  $\Delta m_{23}^2$  и  $\theta_{23}$ .

Если  $\sin^2 2\theta_{23} < 1(0.97)$ , то определить в каком октанте находится угол  $\theta_{23}$ .

Если  $\theta_{23} < 45^\circ$ , то (в массивном состоянии  $\nu_3$  примесь  $\nu_\tau$  больше, чем  $\nu_\mu$ ) и наоборот, если  $\theta_{23} > 45^\circ$

3-х флейворная парадигма хорошо описывает подавляющее большинство данных. Осцилляционные эксперименты на коротких расстояниях наблюдают аномальные эффекты  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ,  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  переходов и большие вероятности исчезновения из пучка, т.е.  $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$  аномалия в экспериментах с радиоактивными источниками и реакторными  $\bar{\nu}_e$ .

# Иерархия масс нейтрино



Один из способов определения иерархии масс нейтрино - измерение влияния вещества на вероятности  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  и  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  переходов.

## Упорядоченность (иерархия) масс нейтрино

Массы нейтрино существенно меньше масс фундаментальных частиц

- Нормальная иерархия масс (NH)

$$m_1 \ll m_2 \ll m_3 \text{ и } \Delta m_{12} \ll \Delta m_{23}$$

$$m_1 \ll \sqrt{\Delta m_{12}^2}, \quad m_2 = \sqrt{m_1^2 + \Delta m_{12}^2} \geq \sqrt{\Delta m_{12}^2} = 8.68 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$$

$$m_3 = \sqrt{m_1^2 + \Delta m_{12}^2 + \Delta m_{23}^2} \geq \sqrt{\Delta m_{23}^2} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}$$

Два легких  $m_1, m_2$  и одно тяжелое нейтрино  $m_3$

- Обратная иерархия масс (IH)

$$m_3 \ll m_1 \ll m_2 \text{ и } \Delta m_{12} \ll \Delta m_{13}$$

$$m_3 \ll \sqrt{\Delta m_{13}^2}, \quad m_1 = \sqrt{m_3^2 + \Delta m_{13}^2} \geq \sqrt{\Delta m_{13}^2} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}$$

$$m_2 = \sqrt{m_3^2 + \Delta m_{13}^2 + \Delta m_{12}^2} \geq \sqrt{\Delta m_{13}^2 (1 + \Delta m_{12}^2 / 2\Delta m_{13}^2)} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}$$

Одно легкое  $m_3$  и два 'тяжелых'  $m_1, m_2$  нейтрино. Состояния  $\nu_1, \nu_2$  являются квази-вырожденными, чего нет в спектре масс заряженных лептонов.

Масса хотя бы одного нейтрино  $\geq 50$  мэВ.

- Квази-вырожденный спектр масс

$$m_1 \simeq m_2 \simeq m_3 \geq 0.1 \text{ эВ}, \quad m_1(m_3) \gg \sqrt{\Delta m_{23}^2} (\sqrt{|\Delta m_{13}^2|})$$

- Мы не знаем абсолютных значений и иерархии масс нейтрино. Не исключено, что  $m_{lig} \ll 10^{-3} \text{ эВ}$ , или  $m_1 \simeq m_2 \simeq m_3$ .

## 3-х флейворная парадигма - осцилляции в вакууме

$P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$  - вероятность выживания  $\nu_e$  ( $\bar{\nu}_e$ ) в вакууме - реакторные антинейтрино.

$$P_{\nu_e, \nu_e} = 1 - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 \theta_{12} \sin^2 \Delta_{21} - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \Delta_{ee},$$
$$\sin^2 \Delta_{ee} = \cos^2 \theta_{12} \sin^2 \Delta_{31} + \sin^2 \theta_{21} \sin^2 \Delta_{32} \approx \sin^2 \Delta_{32}$$

Измерение угла  $\theta_{13}$  - эксперименты с реакторными  $\bar{\nu}_e$  на расстояниях  $\sim 1$  км

Вероятность выживания  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$  (атм. и ускорительные нейтрино)

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \approx 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \Delta_{31}$$

Измерение  $\sin^2 \theta_{23}$  и  $\Delta m_{23}^2$



# Осцилляции нейтрино в веществе

Эффект вещества (Михеев-Смирнов-Волфенштайн): в веществе  $\nu_e$  и  $\nu_{\mu,\tau}$  взаимодействуют не одинаково.

A. Smirnov arXiv:1609.02386

$\nu_e$  находится в потенциале  $U_e$ , а  $\nu_{\mu,\tau}$  в потенциале  $U_{\mu,\tau}$ . Разность потенциалов определится амплитудой рассеяния вперед  $\nu_e$  заряженным током на электронах и  $V = U_e - U_{\mu,\tau} = G_F N_{Av} \rho(x) / \sqrt{2}$ , где  $\rho(x)$  - плотность вещества

Случай 2-х нейтрино в веществе с постоянной плотностью

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_X) = \sin^2 2\theta_m \sin^2 \left( \Delta m^2 L R^{-1/2} / 4E \right),$$

где  $\sin^2 2\theta_m = \sin^2 2\theta \cdot R$ ,  $R = [\sin^2 2\theta + (\cos \theta \mp A)^2]^{-1}$  и параметр  $A = 2VE / \Delta m^2 = 7.63 \cdot 10^{-5} \rho(g/cm^3) E(GeV) / \Delta m^2(eV^2)$  “-” для нейтрино и “+” для антинейтрино.

Для  $\Delta m^2 > 0$  (нормальная иерархия масс)  $\sin^2 2\theta_m > \sin^2 2\theta$  для  $\nu_e \rightarrow \nu_X$  осцилляций (усиление) и  $\sin^2 2\theta_m < \sin^2 2\theta$  для  $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_X$  осцилляций (ослабление).

And vice versa для  $\Delta m^2 < 0$  (обратная иерархия масс), т. е. ослабление  $\nu_e \rightarrow \nu_X$  осцилляций и усиление  $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_X$ . Знак  $\Delta m^2$  можно определить, измерив вероятности  $\nu_e \rightarrow \nu_X$  и  $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_X$ .

### 3-х флейворная парадигма - осцилляции в веществе

Вероятность появления  $\nu_e$  в пучках  $\nu_\mu$  в веществе. Приближенные решения уравнения эволюции  $\Rightarrow$  разложение по малым параметрам  $\alpha$ ,  $A$ ,  $s_{13}$  и их комбинациям.

Y. Arafune et al. PRD 56,3093 (1997), E.K. Akhmedov et al. JHEP 04, 078, 2004, O.M. Requejo et al. PRD 72, 053002, 2003, M.Freund, PRD 64, 053003 (2001)

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \frac{\sin^2(A-1)\Delta}{(A-1)^2} + \alpha^2 \sin^2 2\theta_{12} \cos^2 \theta_{23} \frac{\sin^2 A\Delta}{A^2} \\ + \alpha \sin 2\theta_{13} \cos(\Delta - \delta) \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \frac{\sin A\Delta}{A} \frac{\sin(A-1)\Delta}{A-1},$$

где  $\Delta = \Delta m_{31}^2 L/4E$ ,  $A = \Delta m_{12}^2/\Delta m_{13}^2 = 0.034$

Асимметрия  $A_{\nu_l'}^{CP} = P(\nu_l \rightarrow \nu_l') - P(\bar{\nu}_l \rightarrow \bar{\nu}_l') = A_\delta^{CP} + A_{matter}$ , где  $A_{matter} \sim L \times E$

$$A_\delta^{CP} \approx \frac{\cos \theta_{23} \sin 2\theta_{12}}{\sin \theta_{23} \sin \theta_{13}} \sin \delta \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}$$

Оценка эффекта вещества в области энергий нейтрино, где эффект  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  осцилляций максимальный, т.е.  $\sin^2 \Delta_{31} \approx 1$ .

$$P_{\mu e}^m \approx P_{\mu e}^v (1 + 2E/E_T)$$

где  $P^m (P^v)$  - вероятность осцилляций в веществе (вакууме) и  $E_T = \Delta m_{31}^2/2V \approx 10$  ГэВ

# Аномальные эффекты

Большинство данных нейтринных экспериментов хорошо описываются в рамках 3-х флейворной парадигмы. Данные экспериментов на малых расстояниях, а также астрофизические и космологические наблюдения “намекают” на существование дополнительных нейтринных массовых состояний.

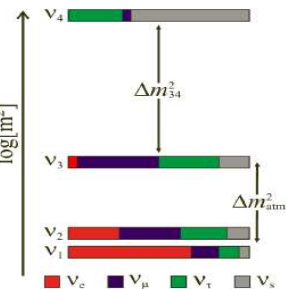
Имеются “маргинальные”, но постоянно повторяющиеся указания на эффекты осцилляций в области  $\Delta m^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$ , которые не согласуются с масштабom солнечных и атмосферных  $\Delta m^2$ :

- (★) избыток  $\bar{\nu}_e$  ( $3.8\sigma$ ) в LSND-эксперименте [A. Aguilar-Arevalo et al. hep-ex/0104049]
- (★) избытки  $\nu_e$  ( $3.4\sigma$ ) и  $\bar{\nu}_e$  ( $2.8\sigma$ ), наблюдаемые в MiniBooNE-эксперименте [A. Aguilar-Arevalo et al. 1303.2588]
- (★) дефицит  $\bar{\nu}_e$  событий ( $0.937 \pm 0.027$ ), наблюдаемый в экспериментах с реакторными нейтрино [G. Meutien et al. 1101.2755]
- (★) дефицит  $\nu_e$  событий ( $0.86 \pm 0.05$ ), наблюдаемый в экспериментах SAGE и GALLEX с радиоактивными источниками нейтрино [C. Giunti and M. Leveder 1006.3244]

Это часто интерпретируется как доказательства существования одного или более дополнительных состояний нейтрино → стерильных нейтрино.

Как следствие, аналогичные эффекты должны наблюдаться и в осцилляционных экспериментах на убывание  $\nu_l \rightarrow \nu_l$  и  $\bar{\nu}_l \rightarrow \bar{\nu}_l$ .

# Легкое стерильное нейтрино, 3+1 схема



Минимальная схема расширения 3-х флейворной парадигмы - дополнительно вводится одно стерильное нейтрино  $\nu_s$  и одно массовое нейтринное состояние  $\nu_4$ .

Матрицу смешивания  $U$  (4x4) можно параметризовать как

$U = R_{34}R_{24}R_{14}R_{23}R_{13}R_{12}$ , где  $R_{ij}$  - матрицы вращения с углами вращения  $\theta_{ij}$  *H.Harari et al. Phys.Lett B181,123 (1986)*.

Появляются 3 новых угла смешивания  $\theta_{14}$ ,  $\theta_{24}$  и  $\theta_{34}$  и две дополнительные дираковских фазы  $\delta_{14}$  и  $\delta_{24}$ .

Углы смешивания  $\theta_{14}$ ,  $\theta_{24}$ ,  $\theta_{34}$  должны быть малы, поскольку вероятности выживания  $P(\nu_l \rightarrow \nu_l)$  хорошо описываются в рамках 3-х флейворной парадигмы.

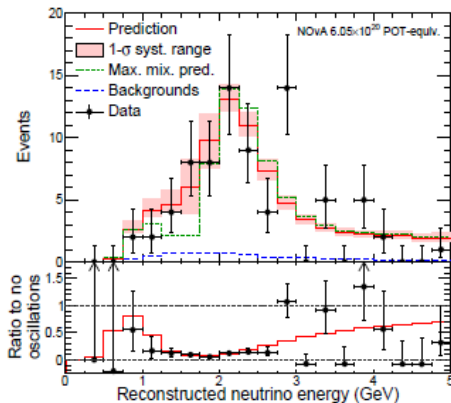
# Long baseline neutrino experiment: NOvA



Off-axis (14 mrad) пучок нейтрино большой интенсивности мощность протонного пучка составляет 0.7 МВт (стат. ошибка).

Используются два детектора: **ND-ближний детектор** (эффекты осцилляций малы) и **FD-дальний детектор** на расстоянии  $L=810\text{ км}$  (NOvA) для регистрации эффектов осцилляций в потоках нейтрино.

Эффект осцилляций максимальный при  $E_{min} \sim \Delta m_{23}^2 L$ , т.е. при  $E \sim 1 \div 3$  ГэВ.



На FD зарегистрировано 78 событий кандидатов, включая 6.5 фоновых событий. В отсутствии осцилляций ожидалось  $473 \pm 30$ . Подгонка параметров осцилляций:

$$\Delta m_{32}^2 = (2.67 \pm 0.11) \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$$

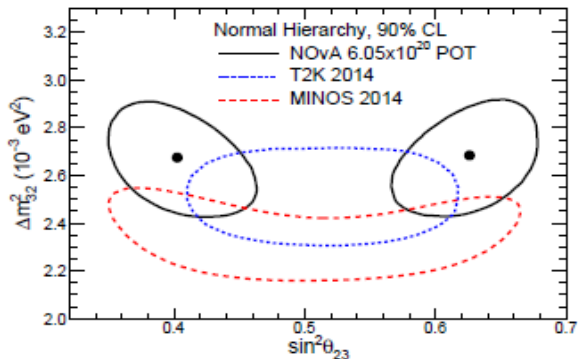
$$\sin^2 \theta_{23} = 0.404^{+0.030}_{-0.022} \text{ и } \sin^2 \theta_{23} = 0.624^{+0.022}_{-0.030} \text{ (NH)}$$

$$\Delta m_{32}^2 = (-2.72 \pm 0.11) \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$$

$$\sin^2 \theta_{23} = 0.398^{+0.050}_{-0.022} \text{ и } \sin^2 \theta_{23} = 0.618^{+0.022}_{-0.030} \text{ (IH)}$$

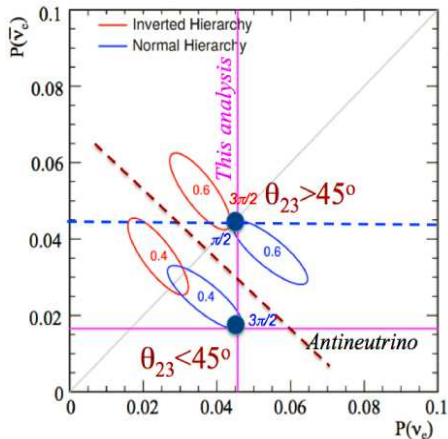
Ожидаемое число событий - 82.4

При максимальном смешивании  $\sin^2 \theta_{23} = 0.5$ ,  $\Delta m_{32}^2 = 2.48 \times 10^{-3} \text{ эВ}^2$  (NH) и ожидаемое число событий = 77.7 Область энергий  $1 \div 2$  ГэВ наиболее чувствительна к максимальному смешиванию.



В плоскости  $(\Delta m_{32}^2, \sin^2 \theta_{23})$  имеются две изолированные области разрешенных значений параметров осцилляций. Максимальное смешивание  $\theta_{23} = \pi/2$  ( $\mu - \tau$  симметрия в состоянии  $\nu_3$ ) исключается со значимостью  $2.6\sigma$ .

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \sim \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \dots$$



Области разрешенных значений параметров ( $\sin^2 \theta_{23}, \delta_{CP}$ ).

На FD зарегистрировано 33 кандидата в  $\nu_e$  события. Ожидаемый фон  $8.2 \pm 0.8(\text{sys})$  событий.

Фитировались одновременно спектры  $\nu_\mu$  и  $\nu_e$  событий, как функции  $\Delta m_{32}, \theta_{23}, \delta_{CP}$ . Значения  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.085 \pm 0.05, \Delta_{21}, \theta_{12}$  - фиксированы PDG.

Имеются два вырожденных решения для NH:  $\sin^2 \theta_{23} = 0.404, \delta_{CP} = 1.8\pi$  и  $\sin^2 \theta_{23} = 0.623, \delta_{CP} = 0.74\pi$

В случае обратной иерархии масс для всех значений  $\delta_{CP}$  и углов  $\theta_{23}$  ожидается меньше событий, чем зарегистрировано. Best fit -  $\delta_{CP} \sim 3\pi/2$ .



# Long baseline neutrino experiment: T2K

## T2K Experiment



Super-Kamiokande  
(ICRR, Univ. Tokyo)



Off-axis ( $2.5^\circ$ ) пучок нейтрино большой интенсивности. Мощность протонного пучка составляет 0.4 МВт (стат. ошибка).

Используются три детектора: два ближних детектора-Токай (эффекты осцилляций малы) и FD-дальний детектор на расстоянии  $L=295\text{ км}$  (SK) для регистрации эффектов осцилляций в потоках нейтрино.

Эффект осцилляций максимальный при  $E_{min} \sim \Delta m_{23}^2 L$ , т.е. при  $E \sim 0.6 \div 0.7$  ГэВ.

$\nu_\mu$ - мода: экспозиция  $7.482 \times 10^{20}$  POT, зарегистрировано 135 мюонных событий и 32 электронных события.

$\bar{\nu}_\mu$ - мода: экспозиция  $7.471 \times 10^{20}$  POT, зарегистрировано 66 мюонных событий и 4 электронных события.

Совместный фит спектров событий от  $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_e, \bar{\nu}_e$

Значения параметров  $\Delta m_{21}, \sin^2 2\theta_{12}$  фиксированы.

PDG.

Оценивались значения параметров  $\Delta m_{32}, \sin^2 \theta_{23}, \sin^2 \theta_{13}, \delta$

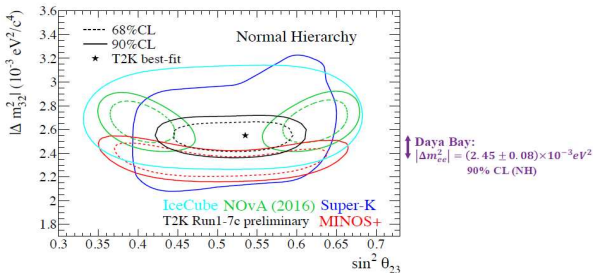
Best fit:  $\delta_{CP} = -1.794(NH), \quad \delta_{CP} = -1.414(IH)$

Гипотеза сохранения CP-инвариантности ( $\delta_{CP} = 0, \pi$ ) исключается на 90% д.у..

*K.Abe et al. arXiv:1701.00432*

# $\theta_{23}$ and $\Delta m_{32}^2$

- Consistent with maximal mixing



	NH	IH
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.532^{+0.046}_{-0.068}$	$0.534^{+0.043}_{-0.066}$
$ \Delta m_{32}^2  [10^{-3} eV^2]$	$2.545^{+0.081}_{-0.084}$	$2.510^{+0.081}_{-0.083}$

Чувствительность к нарушению CP-инвариантности:

$$N(\delta_{CP} = \pm\pi/2)/N(\delta_{CP} = 0, \pi) \approx 1.2$$

Чувствительность к эффекту вещества:  $N(NH)/N(IH) \approx 1.09$

Данные T2K предпочитают  $\sin^2 \theta_{23} > 0.5$  с вероятностью 61%

*K.Abe et al. arXiv:1701.00432*

## Совместный фит данных SK + T2K + NOvA

*F. Capozzi et al. arXiv:1703.004471*

- (★) NH:  $(m_1, m_2, m_3) > (0, 0.86, 5.06) \times 10^{-2} \text{эВ}$   
IH:  $(m_1, m_2, m_3) > (4.97, 5.04, 0) \times 10^{-2} \text{эВ}$
- (★)  $m_1 + m_2 + m_3 < [0.06(\text{NH}), 0.10(\text{IH})(\text{Planck 2015}) \div 0.18(m_{eff} \text{ KamLAND} - \text{Zen at } 2\sigma) \div 2(\nu_e \text{ Troitsk})] \text{эВ}$
- (★) NH предпочитает значение  $\theta_{23} < \pi/4$
- (★) Ускорительные данные лучше согласуются со значением фазы  $\delta \sim 3\pi/2$ , и исключают значение  $\delta \sim \pi/2$  со значимостью  $3\sigma$

(★) “Реакторные аномалии”

Потоки  $\bar{\nu}_e$ , измеренные в экспериментах Daya Bay *F.An et al. PRL 116,061801 (2016)*, RENO *J.H. Choi et al. PRL 116,211801 (2016)*, Double Chooz *Y. Abe et al. JHEP 10,(2014),086; 02(2015),74*, оказались на 5% меньше, чем предсказанно в расчетах *P. Huber et al. PRC 84,024617 (2011)*, *T.A.Mueller et al. PRC 83,054615 (2011)*. Неопределенность в потоках  $\bar{\nu}_e$  оценивалась  $\approx 2\%$ .

Daya Bay - Расхождение с предсказаниями модели Huber-Mueller потока  $\bar{\nu}_e$  от  $^{235}\text{U}$  составляет 7.8% - **нельзя описать  $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_s$  осцилляциями** *A.P.An et al. arXiv:1704.01082*

Результаты последнего анализа показали, что неопределенность в потоках реакторных  $\bar{\nu}_e$  составляет  $\approx 5\%$ . *A.C. Hayes et al. PRL 112,202501 (2014)*, *P.Vogel arXiv 1603.08990*, *A.C. Hayes and P.Vogel arXiv 1605.02047*

(★) MINOS

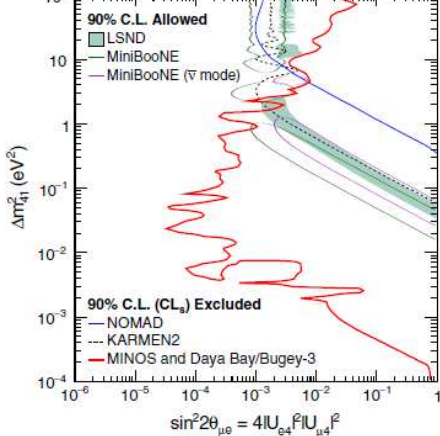
Фитировались отношения спектров событий (от взаимодействия нейтрино заряженным (CC) и нейтральным (NC) токами), измеренных в ND и FD,  $FD(CC)/ND(CC)$  и  $FD(NC)/ND(NC)$ . Подгонялись значения  $\Delta m_{41}^2, \Delta m_{32}^2, \theta_{23}, \theta_{24}, \theta_{34}, \theta_{41}$ . Фазы  $\delta_{13} = \delta_{14} = \delta_{24} = 0$ . *P.Adamson et al. PRL 117,151803,(2016)*

(★) Daya Bay

Фитировались отношения спектров, измеренных на ближних детекторах (3 детектора). Свободные параметры -  $\sin^2 2\theta_{14}, \sin^2 2\theta_{13}, |\Delta m_{41}^2|$ . *F.P.An et al. PRL 117,151802 (2016)*

(★) Анализ данных Bugey-3.

*B.Achkar et al. NPB 434,503, (1995)*



MINOS + Daya Bay + Bugey3 ограничения на  $\sin^2 2\theta_{\mu e}$  на 90% д.у.

При  $\Delta m_{41}^2 = 1.2 eV^2$  ограничение

$\sin^2 2\theta_{\mu e} < [3 \times 10^{-4} (90\% C.L.), 4.5 \times 10^{-4} (95\% C.L.)]$

Область  $\Delta m_{41}^2 < 0.8 eV^2$ , разрешенная данными LSND и MiniBooNE, исключается на 95% д.у.

*P.Adamson et al. PRL 117,151803,(2016)*

IceCube:  $\sin^2 2\theta < 0.1$  при  $\Delta m_{41}^2 \in (0.1, 10) eV^2$   
(2016)

*M.Aartsen et al. PRL 117,071801, (2016)*

Наблюдается противоречие между результатами экспериментов на исчезновение из пучка и результатами экспериментов на появление в пучке, на коротких расстояниях.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- (★) 3-х флейворная парадигма хорошо описывает подавляющее большинство данных.
- (★) **NOvA эксперимент**  
 Смешивание не максимальное, т.е.  $\theta_{23} \neq 45^\circ$  - достоверность **2.6 $\sigma$**   
 $\theta_{23} < 45^\circ$  - нормальная иерархия масс и  $\delta \sim 3\pi/2$ .  
 $\theta_{23} > 45^\circ$  - обратная иерархия масс и  $\delta \sim 3\pi/2$ , или нормальная иерархия масс и  $\delta \sim \pi/2$ .
- (★) **T2K эксперимент**  
 Смешивание, практически, максимальное: best fit  $\sin^2 \theta_{23} \approx 0.532$  с вероятностью 61%  
 Фаза: best fit:  $\delta_{CP} = -1.79$  при нормальной иерархии масс и  $\delta_{CP} = -1.41$  при обратной иерархии масс  
 $\delta_{CP} = (0, \pi)$  исключается на 90% д.у.
- (★) **Стерильное нейтрино**  
**MINOS + Daya Bay + Bugey3** эксперименты исключают на **95%** д.у. область  $\Delta m^2 < 0.8 \text{ эВ}^2$ , разрешенную LSND и MiniBooNE данными.
- (★) Мы не знаем механизма, ответственного за генерацию масс нейтрино. Но, можно утверждать, что необходим выход за рамки Стандартной модели.
- (★) Картина лептонного смешивания отличается от того, что мы наблюдаем в кварковом секторе. Мы не знаем что это значит, но точное измерение углов смешивания может дать важную информацию для решение этой проблемы